

0 7 2 3 4 2 0 - 1

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ГЛАВНАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ**

На правах рукописи

УДК 524.7-732:524.354.2-732

Калекин Олег Руфимович

**ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК КАК
ИСТОЧНИКОВ ГАММА-КВАНТОВ СВЕРХВЫСОКИХ
ЭНЕРГИЙ**

Специальность

01.03.02 – Астрофизика и радиоастрономия.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2001

Работа выполнена в Крымской астрофизической обсерватории
министерства образования и науки Украины.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник

Степанян А.А.
(КрАО)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник

Шибанов Ю.А.
(ФТИ им. А.Ф.Иоффе)

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник

Зацепин В.И.
(НИИЯФ МГУ)

Ведущая организация:

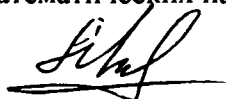
Санкт-Петербургский государственный технический университет

Защита диссертации состоится " 26 " октября 2001г.
в 14 часов 00 минут на открытом заседании диссертационного
совета (шифр К 002.120.01) в Главной астрономической
обсерватории РАН по адресу:
196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН.

Автореферат разослан " 12 " 09 2001г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Е.В.Милецкий
НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
КФУ



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. Проблема происхождения космических лучей возникла сразу после их открытия. Чтобы объяснить энергетику космических лучей, пришлось обратиться к галактическим и внегалактическим объектам с высоким энерговыделением: сверхновым звездам, активным галактикам. Все эти объекты являются одними из самых интересных в современной астрофизике и составляют важные звенья в эволюции Вселенной.

Космические лучи, состоящие в основном из протонов и ядер других химических элементов, во время распространения взаимодействуют с веществом и магнитными полями. Поэтому вблизи Земли космические лучи достаточно изотропны. По этой причине они несут лишь косвенную информацию о процессах, происходящих в породивших их объектах.

Более адресную информацию об этих объектах несет электромагнитное излучение всех диапазонов - от радио до гамма-квантов, возникающее при генерации космических лучей. Обнаружение потоков гамма-квантов от наблюдаемых объектов свидетельствует об ускорении частиц до сверхвысоких энергий и, таким образом, дает ценнейшую информацию о происхождении космических лучей и о физических процессах, протекающих вблизи перечисленных объектов.

Земная атмосфера непрозрачна для гамма-квантов. Одним из способов их детектирования являются внеатмосферные спутниковые наблюдения. Орбитальные гамма-телескопы регистрируют гамма-кванты высоких энергий (ВЭ), диапазон 10^8 - 10^{10} эВ. Наблюдения более высоких энергий практически невозможны из-за малости потоков гамма-квантов и малой площади детекторов. Так, например, для регистрации одного гамма-кванта с энергией >1 ТэВ орбитальным телескопом EGRET требуется порядка трех месяцев.

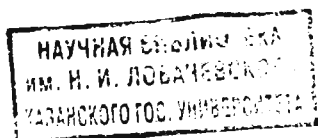
Но зарегистрировать гамма-кванты с энергией $>100\text{ГэВ}$ (сверхвысокие энергии, СВЭ) можно с поверхности Земли. Гамма-кванты и высокоэнергичные частицы космических лучей рождают в атмосфере каскады вторичных частиц - так называемые широкие атмосферные ливни (ШАЛ) [1]. Заряженные частицы этих ливней летят со скоростью выше фазовой скорости света в атмосфере и являются источниками Черенковского излучения [2]. Вспышки этого излучения от ШАЛ освещают на земле площадь порядка нескольких десятков тысяч квадратных метров. Этим и определяется эффективная площадь регистрации гамма-квантов наземными телескопами.

Открытие активных ядер галактик (АЯГ) Mk 421 [3] и Mk 501 [4] как источников гамма-квантов СВЭ показало перспективность наземных исследований потоков гамма-квантов. АЯГ стали основными объектами наблюдений в наземной гамма-астрономии.

Связь с научными программами, планами, темами.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с научными планами Крымской астрофизической обсерватории по теме 1.8.4.5.3 "Космические лучи, их источники и энергетика" 01.87.0003067.

Целью данной работы является определение величин потоков от наблюдавшихся на гамма-телескопе ГТ-48 объектов, нахождение их светимости в диапазоне гамма-квантов сверхвысоких энергий. Исследованными источниками являются остаток сверхновой Крабовидная туманность, активные ядра галактик Mk 501, BL Lac и 3C 66A.



Научная новизна работы.

1. Впервые успешно использована регистрация ультрафиолетового излучения ШАЛ для отбора гамма-квантов.
2. Предложен и успешно применен для отбора гамма-квантов параметр для стереодетектора.
3. Впервые зарегистрированы потоки гамма-квантов от двух активных ядер галактик - BL Lac и 3C 66A. Определена светимость этих объектов в гамма-квантах сверхвысокой энергии.

Научная и практическая ценность работы.

1. Накопленный банк данных модельных событий (гамма-квантов, протонов и ядер гелия) может использоваться для расчетов по модернизации телескопа ГТ-48, для развития методов отбора гамма-квантов.
2. Полученные с помощью моделирования характеристики телескопа ГТ-48 позволяют делать с большей точностью оценки величин регистрируемых потоков гамма-квантов.
3. Полученные величины светимости активных ядер галактик в гамма-квантах сверхвысоких энергий необходимо учитывать в теоретических моделях ускорения частиц и излучения в этих объектах.
4. Величины регистрируемых потоков от АЯГ могут быть использованы при оценке плотности межгалактического инфракрасного фонового излучения, с фотонами которого эффективно взаимодействуют гамма-кванты с энергией ~ 1 ТэВ.

На защиту выносятся:

1. Результаты наблюдений трех активных ядер галактик Mk 501, BL Lac и 3C 66A и Крабовидной туманности с помощью наземного черенковского детектора. В результате установлено, что эти объекты являются

источниками излучения гамма-квантов СВЭ. Для двух активных ядер галактик BL Lac и 3C 66A поток наблюдался впервые.

2. Оценки величин потоков от Mk 501, BL Lac, 3C 66A и Крабовидной туманности, полученные с использованием моделирования. На основании величин потоков и известного красного смещения сделаны оценки светимости АЯГ в диапазоне гамма-квантов СВЭ.
3. Новый эффективный параметр отбора гамма-квантов для сдвоенного детектора.
4. Результаты расчетов величин энергетического порога и эффективной площади регистрации гамма-квантов гамма-телескопом ГТ-48 Крымской астрофизической обсерватории.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались на научных семинарах отдела физики звезд и галактик Крымской астрофизической обсерватории, на международных совещаниях по наземной гамма-астрономии в Токио (25-27 мая 1994 года) и в Падове (Италия, 11-13 сентября 1995 года), на международных конференциях по космическим лучам в Риме (28 августа-8 сентября 1995 года) и в Москве (1998), на совещании Европейского астрономического общества в Москве (29 мая-3 июня 2000 года), на межрегиональной конференции по космическим лучам в Москве (июль 2000 года).

Основные результаты диссертации изложены в 14 публикациях, список которых приведен в конце автореферата.

Личный вклад соискателя.

Диссертант участвовал в работах по модернизации телескопа ГТ-48, в составлении компьютерных программ обработки данных, управления телескопом и контроля его работы, создал программу регистрации черенковских вспышек, принимал участие в наблюдениях всех объектов.

В публикациях (1)-(5) соискатель выполнял анализ данных наблюдений, в работах (6), (7) проводил предварительную обработку данных наблюдений. Работа (8) выполнена самостоятельно. В работах (9)-(11) диссертант выполнял анализ данных наблюдений, анализ данных моделирования, вычисление потоков гамма-квантов, в работах (12)-(14) проводил предварительную обработку данных наблюдений, анализ данных моделирования, вычисление потоков гамма-квантов.

Содержание диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы (125 наименований). Полный объем диссертации 104 страницы машинописного текста, включая 22 рисунка, 11 таблиц.

Во **Введении** кратко дается история развития наземной гамма-астрономии, ее современное состояние. Приводится обоснование актуальности работы, описана поставленная задача и способ ее решения, освещены новизна, научная и практическая ценность полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту, указано, где диссертация прошла апробацию, дано краткое содержание диссертации, определен личный вклад автора.

Первая глава является обзорной. В ней описаны достижения наземной гамма-астрономии на протяжении всего ее развития от телескопов первого поколения (§1.1), работавших в режиме счета черенковских вспышек, до нынешних телескопов второго поколения (§1.2) с многоканальными светоприемными камерами, позволяющими проводить отбор гамма-квантов. Рассмотрены типы объектов, являющихся потенциальными источниками гамма-квантов СВЭ. Это остатки сверхновых, двойные рентгеновские системы, пульсары, активные ядра галактик. Основными

трудностями при исследовании источников гамма-квантов являются: 1) наличие большого фона космических лучей (к.л.), которые рождаю в атмосфере вспышки, похожие на вспышки от гамма-квантов; 2) из наблюдений невозможно определить энергию и эффективность регистрации первичных гамма-квантов. Путем совершенствования методов отбора гамма-квантов, повышающего эффективность наблюдений, и проведения моделирования развития ШАЛ, позволяющего определить характеристики первичного излучения, указанные трудности преодолеваются.

Во второй главе даны описания гамма-телескопа ГТ-48 (§2.1), методики наблюдений потенциальных источников гамма-квантов (§2.2), методики анализа данных наблюдений (§2.3). Телескоп состоит из двух независимых секций. Каждая секция представляет собой азимутальную монтировку, на которой установлены зеркала и 37-канальн светоприемные камеры в их фокальной плоскости. Общая площадь зеркал телескопа 54м^2 . Во время наблюдений телескоп работает в режиме совпадений между секциями. Источник и фон наблюдаются поочередно. Зарегистрированные изображения черенковских вспышек параметризуются методом моментов. Имеющиеся отличия между изображениями вспышек, инициированных гамма-квантами и фоновыми частицами космических лучей, позволяют проводить отбор гамма-квантов, исключая значительную часть фоновых событий. Для отбора обычно используются параметры, связанные с размерами и ориентацией вспышек. Особенности телескопа ГТ-48 позволяют применять новые параметры, связанные с регистрацией ультрафиолетового излучения черенковских вспышек и стереоскопичностью установки.

Третья глава посвящена моделированию развития ШАЛ и моделированию регистрации этих ливней гамма-телескопом. Для моделирования ливней использована компьютерная программа Пляшешникова А.В. [5]. В §3.1 рассмотрено моделирование ШАЛ от фона космических лучей.

Фон задавался протонами и ядрами гелия, составляющими при энергиях ~ 1 ТэВ подавляющую часть к.л. С помощью моделирования регистрации этих ливней гамма-телескопом ГТ-48 получены изображения модельных вспышек. Полученные данные обрабатывались по той же методике, что и данные наблюдений. Путем сравнения результатов моделирования и реальных наблюдений фона космических лучей определены характеристики телескопа ГТ-48: электронный порог регистрации событий (18 фотоэлектронов), коэффициент преобразования фотоэлектронов в дискреты зарядоцифрового преобразователя (0.77 фотоэлектронов/дискрет), энергетический порог регистрации фона космических лучей, который составил 1.6 ТэВ. Используя эти характеристики, проведено моделирование ШАЛ от гамма-квантов (§3.2). Для телескопа ГТ-48 установлен энергетический порог регистрации гамма-квантов составивший 1.0 ТэВ, зависимость эффективности регистрации гамма-квантов от энергии, определена эффективная площадь регистрации гамма-квантов, которая составляет $4.1 \times 10^4 \text{ м}^2$, получены частотные распределения параметров модельных гамма-квантов. Сравнение этих распределений с распределениями для фона к.л. показывает, что отбор гамма-квантов по каждому из параметров, обсуждавшихся в §2.3, приводит к увеличению отношения сигнал/шум в данных наблюдений в $1.2 \div 1.8$ раза.

В четвертой главе проведен анализ данных наблюдений Крабовидной туманности за 1993 год (§4.1) и блазара Мк 501 за 1997 год (§4.2). Получены частотные распределения основных параметров. С их использованием произведен отбор гамма-квантов. Определены достоверности наличия потоков от объектов, соответствующие приблизительно 5 и 11 стандартным отклонениям соответственно. Методом пробных источников определены направления, из которого зарегистрированы потоки. Они совпали с координатами объектов с точностью до 0.1° , лежащей в пределах

ошибки метода. Путем сопоставления скорости счета отобранных при анализе данных гамма-квантов с модельной эффективностью их регистрации и степенью исключения при отборе рассчитаны интегральные величины потоков от исследуемых объектов, усредненные по всему времени наблюдений. Поток гамма-квантов с энергией $E > 1 \text{ ТэВ}$ составил $(5.0 \pm 0.6) \times 10^{-11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для Мк 501 и с энергией $E > 2 \text{ ТэВ}$ - $(8.4 \pm 2.8) \times 10^{-12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для Крабовидной туманности. Для блазара Мк 501 проведен анализ временных вариаций потока. Установлено, что поток является переменным с минимальным характерным временем переменности одни сутки. Это ограничивает размер излучающей области величиной $3 \times 10^{15} \text{ см}$. В (§4.3) приведен список объектов, зарегистрированных как источники гамма-квантов, в период с 1993 по 1998 год с помощью наземного черенковского детектора ГТ-48 Крымской астрофизической обсерватории. Кроме Крабовидной туманности и Мк 501 это блазары BL Lac и 3C 66A. Для двух последних также рассчитаны величины наблюдавшихся потоков. Они составили соответственно $(3.0 \pm 0.9) \times 10^{-11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и $(2.1 \pm 0.5) \times 10^{-11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для энергии гамма-квантов $E > 1 \text{ ТэВ}$. На основании вычисленных потоков и известного расстояния до АЯГ определены их светимости в диапазоне гамма-квантов СВЭ. Для Мк 501 это BL Lac светимость приблизительно равна $3 \times 10^{44} \text{ эрг/с}$, для 3C 66A - $2 \times 10^{46} \text{ эрг/с}$. Энерговыведение в гамма-квантах СВЭ примерно равно энерговыведению этих объектов в видимом диапазоне и гамма-квантах высокой энергии.

В **Заключении** диссертации сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты и выводы

1. Выполненное моделирование позволило более точно определить характеристики гамма-телескопа ГТ-48. Пороговая энергия регистрации гамма-квантов составила 1.0 ТэВ, частиц фона космических лучей (протонов и ядер гелия) 1.6 ТэВ. Эффективная площадь регистрации гамма-квантов $4.1 \times 10^4 \text{ м}^2$.

2. В результате наблюдений на гамма-телескопе ГТ-48 зарегистрированы потоки гамма-квантов сверхвысокой энергии от Крабовидной туманности и блазара Mk 501. Выполненные с использованием моделирования оценки величин потоков гамма-квантов от Крабовидной туманности и АЯГ Mk 501, дают значения, которые согласуются с оценками потоков, даваемых другими экспериментами, в которых проводились наблюдения этих объектов.

3. По результатам обработки данных наблюдений Крабовидной туманности можно сделать вывод, что применение новых параметров (UV , DRO) позволяет повысить эффективность отбора гамма-квантов.

4. Mk 501 является переменным источником гамма-квантов. Наименьшее время переменности достигает 1 суток. Это ограничивает размер излучающей области. Она не должна превышать $3 \times 10^{15} \text{ см}$.

5. Блазары BL Lac, 3C 66A, являются источниками гамма-квантов сверхвысокой энергии. Светимости блазаров в гамма-квантах сверхвысокой энергии приблизительно равны светимости в оптическом диапазоне и гамма квантах высокой энергии. Это указывает на то, что механизмы излучения во всех этих объектах могут быть схожими.

Цитируемая литература.

1. Мурзин В.С. *Физика космических лучей*. 1970, Изд. Московского Университета, гл. 9, § 2, стр. 216.

2. Джелли Дж. *Черенковское излучение и его применения*. Москва, 1960, Изд. иностранной литературы, гл. 9, стр. 241.
3. Шубнелл и др. (M.S.Schubnell, C.W.Akerlof, S.Biller et al.) *Very high energy gamma-ray emission from the blazar Markarian 421*. *Astrophys. J.*, 1996, v. 460, p. 644.
4. Куин и др. (Quinn J., Akerlof C.W., Biller S. et al.) *Detection of gamma rays with $E > 300$ GeV from Markarian 501*. *Astrophys. J. Lett.*, 1996, v. 456, L83.
5. Конопелько и Пляшешников (Konopelko A.K., Plyasheshnikov A.V.) *ALTAI: computational code for the simulations of TeV air showers as observed with the ground based imaging atmospheric Cherenkov telescope*. *Nucl. Instr. And Meth. in Phys. Res.*, accepted for publication.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- 1) O.R. Kalekin, A.A.Stepanian, Yu.I. Neshpor. "Using stereo effect and ultraviolet radiation for the selection of the gamma rays". *Towards a Major Atmospheric Cerenkov Detector III*, Ed. T.Kifune, Universal Academy Press, Inc. - Tokyo, Japan, 1994, p.107-112.
- 2) О.Р. Калекин, Ю.И. Нешпор, А.А. Степанян и др. "Результаты наблюдений Крабовидной туманности на гамма-телескопе ГТ-48 в Крымской астрофизической обсерватории". *Письма в астрономический журнал*, 1995, т. 21, № 3, стр. 184-189.
- 3) О.Р. Калекин, Ю.И. Нешпор, А.А. Степанян, Н.Н. Чаленко, В.Г.Шитов "Новый наземный гамма-телескоп ГТ-48 Крымской Астрофизической Обсерватории: первые научные результаты", *Кинематика и физика небесных тел*, 1996, т. 12, № 2, стр. 92-96.

- 4) Ю.И.Нешпор, О.Р.Калекин, А.А.Степанян, Н.Н.Чаленко, "О природе вспышек, регистрируемых черенковскими детекторами." Известия РАН, сер. физ., 1997, т. 61, стр. 609-612.
- 5) N.N. Chalenko, O.R. Kalekin, Yu.I. Neshpor, A.A. Stepanian " The effective technigue of the charged particles background discrimination in the atmospheric Cherenkov light detectors". Journal of Astrophysics and Astronomy. Published by The Indian Academy of Sciences, 1997, v. 18, p. 151-159.
- 6) Yu.I.Neshpor, A.A.Stepanian, O.R.Kalekin, V.P.Fomin, N.N.Chalenko, V.G.Shitov. "Blazar 3C66A - one more extragalactic source of very high energy radiation". OJ-94 Annual meeting, an International Workshop on Multifrequency monitoring of Blazars, Ed. G.Tosti and L.Takalo, Perugia University Observatory Publications, 1997, v. 3, p.74-80.
- 7) Ю.И. Нешпор, А.А. Степанян, О.Р. Калекин, В.П. Фомин, Н.Н. Чаленко, В.Г. Шитов "Блазар 3С66А - еще один внегалактический источник гамма-квантов сверхвысокой энергии". Письма в АЖ, 1998, т. 24, № 3-4, стр. 167-171.
- 8) Калекин О.Р. "О методике оценки энергетического порога гамма-телескопа ГТ-48". Известия КрАО, 1999, т. 95, стр. 167-172.
- 9) Н.А.Андреева, Ю.Л.Зыскин, О.Р.Калекин, Ю.И.Нешпор, А.А.Степанян, В.П.Фомин, Н.Н.Чаленко, В.Г.Шитов, "Временной ход потока гамма-квантов сверхвысокой энергии от Мк 501", Астрофизика на рубеже веков. Сборник трудов. Редакторы Кардашев Н.С., Дагкесаманский Р.Д., Ковалев Ю.А., Москва: изд. АКЦ ФИАН, 1999, стр. 21-22.
- 10) Калекин О.Р., Чаленко Н.Н., Зыскин Ю.Л., Нешпор Ю.И., Степанян А.А., Фомин В.П., Шитов В.Г. "Результаты наблюдений потоков гамма-квантов сверхвысоких энергий, проведенных на детекторе черен-

ковских вспышек ШАЛ в Крымской астрофизической обсерватории".
Изв. РАН сер. физ., 1999, т.63, стр. 606-609.

- 11) Н.А. Андреева, Ю.Л. Зыскин, О.Р. Калекин, Ю.И. Нешпор, А.А. Степанян, В.П. Фомин, Н.Н. Чаленко, В.Г. Шитов "Результаты наблюдений потока гамма-квантов от галактики Мк 501", Письма в АЖ, 2000, т. 26, № 3, стр. 243-248.
- 12) Ю.И. Нешпор, А.А. Степанян, О.Р. Калекин, Н.А. Жоголев, В.П. Фомин, Н.Н. Чаленко, В.Г. Шитов. "Активная галактика 3С 66А - переменный источник гамма-излучения сверхвысокой энергии". Астрономический журнал, 2000, т. 77, № 10, с. 723-729.
- 13) Ю.И.Нешпор, Н.Н.Чаленко, Н.А. Жоголев, Ю.Л.Зыскин, О.Р.Калекин, А.А.Степанян, В.П.Фомин, В.Г.Шитов. "Результаты поиска гамма-излучения сверхвысокой энергии от пульсара Геминга и активного ядра галактики BL Lac" Известия РАН, сер.физ., 2001, т. 65, N 3, с. 455-457.
- 14) Ю.И. Нешпор, Н.Н. Чаленко, А.А. Степанян, О.Р. Калекин, Н.А. Жоголев, В.П. Фомин, В.Г. Шитов. "Галактика BL Lac - источник гамма-квантов сверхвысоких энергий". Астрономический журнал, 2001, т. 78, № 4, с. 291-297.



Подписано в печать 25.05.2001г. Сдано в набор 29.05.2001г.
Формат 60х84. Бумага писчая. Печать ротапунктная.
Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз.

Крымская астрофизическая обсерватория,
98409, Крым, Украина.

